

М.И. Баранов

ВЫБОР ДОПУСТИМЫХ СЕЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ В БОРТОВЫХ ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Надані результати запропонованого інженерного електротехнічного підходу до розрахункового вибору гранично допустимих поперечних перерізів S_{II} електричних неізолюваних дротів, ізолюваних дротів і кабелів з полівінілхлоридною (ПВХ), гумовою (Г) і поліетиленовою (ПЕТ) ізоляцією і мідними (алюмінієвими) жилами (оболочками) по умові їх термічної стійкості, по яких у бортових силових колах електрообладнання літальних апаратів (ЛА) в аварійному режимі протікає струм $i_k(t)$ однофазного короткого замикання (КЗ) із заданими амплітудно-часовими параметрами. На підставі цього підходу здійснений вибір гранично допустимих поперечних перерізів S_{II} для вказаних дротів (кабелів) бортових силових кіл електрообладнання ЛА з частотою змінного струму $f=400$ Гц. Виконана розрахункова оцінка гранично допустимих амплітуд щільності δ_{lim} струму $i_k(t)$ вказаного КЗ в даних дротах і кабелях бортових силових кіл ЛА. Бібл. 18, табл. 5.

Ключові слова: літальний апарат, бортові силові кола електрообладнання, електричні дроти і кабелі, частота змінного струму, вибір гранично допустимих перерізів кабельно-провідниковій продукції.

Приведены результаты предложенного инженерного электротехнического подхода к расчетному выбору предельно допустимых поперечных сечений S_{II} электрических неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей с поливинилхлоридной (ПВХ), резиновой (Р) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией и медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) по условию их термической стойкости, по которым в бортовых силовых цепях электрооборудования летательных аппаратов (ЛА) в аварийном режиме протекает ток $i_k(t)$ однофазного короткого замыкания (КЗ) с заданными амплитудно-временными параметрами. На основании этого подхода осуществлен выбор предельно допустимых поперечных сечений S_{II} для указанных проводов (кабелей) бортовых силовых цепей электрооборудования ЛА с частотой переменного тока $f=400$ Гц. Выполнена расчетная оценка предельно допустимых амплитуд плотности δ_{lim} тока $i_k(t)$ указанного КЗ в рассматриваемых проводах и кабелях бортовых силовых цепей ЛА. Библ. 18, табл. 5.

Ключевые слова: летательный аппарат, бортовые силовые цепи электрооборудования, электрические провода и кабели, частота переменного тока, выбор предельно допустимых сечений кабельно-проводниковой продукции.

Введение. В [1, 2] применительно к задачам промышленной электроэнергетики были рассмотрены вопросы уточненного выбора предельно допустимых S_{II} и критических S_{IC} сечений электрических неизолированных проводов, а также изолированных проводов и кабелей с поливинилхлоридной (ПВХ), резиновой (Р) и полиэтиленовой (ПЭТ) изоляцией и медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) по условиям их соответственно термической стойкости и электрического взрыва (ЭВ). Как известно, расчетными режимами при выборе предельно допустимых сечений S_{II} кабельно-проводниковой продукции (КПП), используемой в силовых цепях электрооборудования с переменным током частотой $f=50$ Гц, являются режимы одно- или трехфазного короткого замыкания (КЗ) [3, 4]. Приведенные в [1-4] технические данные для выбора КПП касаются силовых цепей электрооборудования, применяемого в наземных стационарных объектах при их промышленном электроснабжении переменным током частотой $f=50$ Гц. А как быть с выбором предельно допустимых сечений S_{II} КПП объектов авиационной и ракетно-космической техники, в бортовых электрических сетях которых возможно применение переменного тока частотой f , существенно отличающейся от традиционной промышленной частоты 50 Гц? Ведь не секрет, что массогабаритные показатели бортовой КПП, а значит и значения поперечных сечений S_{II} ее металлических жил (оболочек-экранов), для подобных объектов «выходят» для разработчиков указанной наукоемкой техники на первый план. В этой части следует заметить, что, например, на современном авиалайнере «Airbus 380» протяженность КПП его бортовой сети составляет более 530 км

[5]. При этом суммарная мощность источников электроэнергии на борту летательных аппаратов (ЛА) военного и гражданского назначения может составлять от 20 кВт для легких ЛА до 600 кВт и более для тяжелых ЛА [6]. В этой связи актуальными в области прикладной электротехники применительно к современным ЛА становятся задачи, связанные с исследованиями особенностей применения в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА переменного тока частотой $f>50$ Гц и выбор для таких частот f переменного тока в бортовых сетях ЛА предельно допустимых сечений S_{II} их электрических проводов и кабелей, содержащих внутренние медные (алюминиевые) жилы ($i=1$) и наружные обратные (защитные) оболочки ($i=2$), а также ПВХ, Р и ПЭТ поясную изоляцию.

Целью статьи является выполнение выбора предельно допустимых поперечных сечений S_{II} неизолированных проводов и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в бортовых силовых цепях электрооборудования различных ЛА с переменным током частотой $f>50$ Гц.

1. Постановка задачи. Рассмотрим широко используемые в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА неизолированные медные и алюминиевые провода, а также изолированные провода и кабели с медными (алюминиевыми) внутренними жилами и наружными оболочками-экранами, имеющие ПВХ, Р и ПЭТ поясную (защитную) изоляцию [7]. Принимаем, что по круглым сплошным (расщепленным) медным (алюминиевым) жилам (оболочкам) указанных проводов (кабелей) силовых цепей электрооборудования ЛА, находящихся в воздушной атмосфере с

© М.И. Баранов

температурой $\theta_0=20^\circ\text{C}$ в нормальном режиме их работы под номинальной токовой нагрузкой, в их продольном направлении протекает переменный ток частотой $f>50$ Гц, а максимальная длительно допустимая температура θ_{II} джоулевого нагрева для не- и изолированных проводов (кабелей) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией численно не превышает регламентируемых действующими требованиями для электроэнергетических устройств уровней в 70°C и 65°C соответственно [8]. Пусть для общности решаемой электротехнической задачи в силовых цепях ЛА с КПП возможны режимы их работы, когда какие-то участки их проводов (кабелей) могут быть полностью обесточены. Считаем, что термическая стойкость рассматриваемых электрических проводов и кабелей бортовых цепей ЛА, как и для наземного стационарного электрооборудования с двухпроводной сетью электропитания, лимитируется предельно допустимой кратковременной температурой θ_{IS} нагрева токонесущих частей проводов (кабелей) при однофазном виде КЗ в исследуемой бортовой сети ЛА. В первом приближении решения формулируемой задачи полагаем, что значения θ_{IS} соответствуют известным предельно допустимым кратковременным температурам нагрева КПП переменным током КЗ промышленной частоты $f=50$ Гц [8]. В этой связи численные значения температуры θ_{IS} для неизолированных медных проводов при тяжениях менее 20 Н/мм^2 будут составлять 250°C , а для неизолированных алюминиевых проводов при тяжениях менее 10 Н/мм^2 – 200°C [8]. Для изолированных проводов и кабелей с медными и алюминиевыми жилами, ПВХ и Р изоляцией численные значения температуры θ_{IS} тогда оказываются равными 150°C , а для рассматриваемой КПП с ПЭТ изоляцией – 120°C [8]. Допускаем, что при выборе сечений S_{II} электрический ток $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА, выполненной по одно- или двухпроводной схеме, практически равномерно распределяется по поперечному сечению жилы и оболочки-экрана исследуемого провода (кабеля). Обоснованием такому допущению является то, что минимальная глубина проникновения Δ_i магнитного поля (толщина скин-слоя) от тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА в квазистационарном приближении в рассматриваемые проводниковые неферромагнитные материалы жилы (оболочки-экрана), определяемая из расчетного соотношения $\Delta_i \approx [1/(\pi f \mu_0 \gamma_{0i})]^{1/2}$ [9], где γ_{0i} – удельная электропроводность материала жилы (оболочки) КПП при $\theta_0=20^\circ\text{C}$, а $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, например, для частот аварийного тока $f=50$ Гц и $f=400$ Гц численно составляет для меди ($\gamma_{0i}=5,81 \cdot 10^7 \cdot (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$) соответственно около 9,3 и 3,3 мм, а для алюминия ($\gamma_{0i}=3,61 \cdot 10^7 \cdot (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$) – 11,8 и 4,2 мм. Видно, что указанные значения толщин скин-слоя Δ_i оказываются соизмеримыми с радиусами (толщинами) токонесущих жил (оболочек) проводов и кабелей, обычно используемыми в цепях электрооборудования рассматриваемых ЛА (в частности, в сетях авиационной техники [7]). Как и в [1, 2] воспользуемся условием адиабатического характера протекающих при временах t_{kC} действия тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА не более $t_{kC}=40f^{-1}=100$ мс в провод-

никовых материалах жил (оболочек) рассматриваемой КПП термических процессов, при котором влиянием теплоотдачи с поверхностей их токонесущих частей, имеющих текущую температуру $\theta_{is} \geq \theta_0$, и теплопроводности слоев их электропроводящих материалов и изоляции на джоулев нагрев токонесущих частей жил (оболочек) исследуемых проводов (кабелей) можно пренебрегать. Требуется расчетным путем в приближенном виде с учетом нелинейного характера изменения из-за джоулевого нагрева исследуемой КПП величины удельной электропроводности γ_i материала ее жил (оболочек) и условия термической стойкости КПП к действию тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА определить в диапазоне изменения частоты переменного тока $f=(50-400)$ Гц в силовых цепях ее электрооборудования предельно допустимые поперечные сечения S_{II} токонесущих частей для неизолированных медных (алюминиевых) проводов, а также для изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, по которым в аварийном режиме работы однопроводной бортовой сети ЛА (с общим «минусом» на его массивном металлическом корпусе, служащим обратным токопроводом [10]) или двухпроводной бортовой сети ЛА [11] протекает ток $i_k(t)$ однофазного КЗ известной длительности t_{kC} и с заданными амплитудно-временными параметрами (АВП). Кроме того, с учетом нахождения поперечных сечений S_{II} необходимо для исследуемой КПП в ЛА определить и предельно допустимые амплитуды плотности δ_{ilm} тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА.

2. Инженерный подход к выбору предельно допустимых сечений S_{II} проводов и кабелей в цепях электрооборудования ЛА. Из уравнения теплового баланса для токонесущих частей КПП бортовых цепей электрооборудования ЛА в адиабатическом режиме и условия их термической стойкости к току $i_k(t)$ указанного КЗ аналитическое выражение для расчетного определения предельно допустимых поперечных сечений S_{II} рассматриваемых электрических проводов и кабелей приобретает следующий вид [1]:

$$S_{II} = [J_{ak} / (J_{IS} - J_{ill})]^{1/2} = J_{ak}^{1/2} / C_{ik}, \quad (1)$$

где $J_{ak} = \int_0^{t_{kC}} i_k^2(t) dt$ – интеграл Джоуля (действия) тока

$i_k(t)$ однофазного КЗ, $\text{А}^2 \cdot \text{с}$; J_{IS} , J_{ill} – интегралы тока для токонесущих частей проводов (кабелей), предельно допустимая кратковременная температура и длительно допустимая температура нагрева материала которых равны θ_{IS} и θ_{II} соответственно, $\text{А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$; $C_{ik} = (J_{IS} - J_{ill})^{1/2}$ – расчетный коэффициент, $\text{А} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{м}^{-2}$.

Из (1) однозначно следует то, что для расчетного определения величин сечений S_{II} необходимо знать значения интеграла Джоуля J_{ak} и коэффициента C_{ik} .

2.1. Определение интегралов тока J_{IS} , J_{ill} и коэффициента C_{ik} для КПП бортовой сети ЛА. Для расчета с инженерной точностью величин входящих в (1) интегралов тока J_{IS} и J_{ill} , применяемых, в частности, в [9] в виде интегралов тока или инерции (см. формулу 4.56), подынтегральная функция которых в отличие от классического интеграла Джоуля

содержит не квадрат аварийного тока $i_k(t)$, а квадрат плотности данного тока $\delta_{ik}(t)$ в электропроводящих материалах КПП бортовой сети ЛА, используем следующие приближенные аналитические выражения [1, 12]:

$$J_{iIS} = \gamma_{0i} \beta_{0i}^{-1} \ln[c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{IS} - \theta_0) + 1]; \quad (2)$$

$$J_{iII} = \gamma_{0i} \beta_{0i}^{-1} \ln[c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{II} - \theta_0) + 1], \quad (3)$$

где c_{0i} , β_{0i} – соответственно количественно определяемые при $\theta_0=20^\circ\text{C}$ удельная объемная теплоемкость ($\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{C})$) и тепловой коэффициент удельной электропроводности ($\text{м}^3/\text{Дж}$) проводящего материала жилы (оболочки) провода (кабеля) бортовой силовой цепи электрооборудования ЛА с током частотой $f>50$ Гц до воздействия на КПП аварийного тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА с заданными АВП.

В табл. 1 приведены численные значения используемых в (2) и (3) электрофизических параметров γ_{0i} , c_{0i} и β_{0i} для основных проводниковых материалов, применяемых в токонесущих частях КПП бортовой сети ЛА при температуре, равной $\theta_0=20^\circ\text{C}$ [9, 12].

Таблица 1

Численные значения характеристик основных материалов токонесущих жил (оболочек) не- и изолированных проводов (кабелей) силовых цепей электрооборудования бортовой сети ЛА при $\theta_0=20^\circ\text{C}$ [9, 12]

Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Численное значение характеристики		
	γ_{0i} , $10^7 \cdot (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$	c_{0i} , $10^6 \cdot \text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	β_{0i} , $10^{-9} \cdot \text{м}^3/\text{Дж}$
Медь	5,81	3,92	1,31
Алюминий	3,61	2,70	2,14

Используя значения указанных характеристик γ_{0i} , c_{0i} и β_{0i} (см. табл. 1), при заданных величинах нормированных температур θ_0 , θ_{IS} и θ_{II} с помощью (2) и (3) могут быть найдены численные значения искомых интегралов тока J_{iIS} , J_{iII} и коэффициента C_{ik} , используемого в (1), для широкой номенклатуры КПП, применяемой в бортовых силовых цепях электрооборудования тех или иных ЛА. В табл. 2 указаны численные значения расчетного коэффициента C_{ik} для основных исполнений КПП, широко применяемой в бортовых силовых цепях электрооборудования различных ЛА.

Таблица 2

Численные значения коэффициента C_{ik} для не- и изолированных проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), применяемых в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА [1]

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электрооборудования ЛА	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Численное значение C_{ik} , $10^8 \cdot \text{А} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{м}^2$	
		$J_{iII} \neq 0$	$J_{iII} = 0$
Без изоляции	Медь	1,56	1,86
	Алюминий	0,88	1,09
ПВХ, Р	Медь	1,16	1,51
	Алюминий	0,74	0,97
ПЭТ	Медь	0,96	1,36
	Алюминий	0,62	0,88

В табл. 2 случай, когда $J_{iII} \neq 0$, соответствует номинальной токовой нагрузке КПП в бортовых силовых

цепях исследуемого электрооборудования ЛА (температура их токонесущих частей равна θ_{II}), а случай при $J_{iII}=0$ – режиму обесточивания КПП в ЛА (температура их токонесущих частей до протекания по ним тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА соответствует температуре окружающей КПП воздушной среды, принятой нами равной $\theta_0=20^\circ\text{C}$). Далее остановимся на нахождении интеграла Джоуля J_{ak} , являющегося основным параметром для расчетного определения по (1) величины искомого сечения S_{il} .

2.2. Определение интеграла действия J_{ak} аварийного тока при КЗ в бортовой сети ЛА. Для этого первоначально запишем аналитическое соотношение, описывающее изменение во времени t тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовых силовых цепях электрооборудования, используемого в различных самолетах и ракетах-носителях и запитанного от бортового источника переменного тока частотой $f>50$ Гц. Согласно [1, 4] АВП этого тока $i_k(t)$ КЗ в бортовой сети ЛА, содержащей активные и реактивные сопротивления, будут подчиняться следующей временной зависимости:

$$i_k(t) = I_{mk} [\exp(-t/T_a) - \cos(2\pi f t)], \quad (4)$$

где I_{mk} – амплитуда установившегося в силовой цепи электрооборудования ЛА тока $i_k(t)$ КЗ, А; T_a – постоянная времени спада аperiodической составляющей аварийного тока $i_k(t)$ КЗ в бортовой цепи ЛА, с.

Из (4) при $f=400$ Гц и $t=1,25$ мс, соответствующем наибольшей амплитуде ударного тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА, следует аналитическое выражение для расчетного ударного коэффициента k_s , характерного для рассматриваемой бортовой системы электроснабжения ЛА в аварийном режиме:

$$k_s = [1 + \exp(-0,00125/T_a)]. \quad (5)$$

При $T_a=3$ мс согласно (5) значение ударного коэффициента k_s оказывается численно равным 1,66. Поэтому при рабочем напряжении переменного тока частотой $f=400$ Гц в бортовой сети ЛА, вырабатываемом, например, бортовым преобразователем типа ПОС-1000 и равном 115 В [6], в режиме однофазного КЗ амплитуда тока отключения в соответствии с данными [13-15] может достигать уровня в (2-25) кА.

Тогда с учетом (1) и (4) выражение для искомого интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ КЗ в бортовой цепи электрооборудования ЛА в принятом приближении приобретает следующий аналитический вид [1]:

$$J_{ak} = I_{mk}^2 \left\{ 0,5 t_{kC} + 0,25 (\pi f)^{-1} \sin(2\pi f t_{kC}) \times \right. \\ \times \cos(2\pi f t_{kC}) - 2 T_a^2 (1 + 4\pi^2 f^2 T_a^2)^{-1} \left[e^{-t_{kC}/T_a} \times \right. \\ \times [2\pi f \sin(2\pi f t_{kC}) - T_a^{-1} \cos(2\pi f t_{kC}) + T_a^{-1}] + \\ \left. \left. + 0,5 T_a (1 - e^{-2 t_{kC}/T_a}) \right\}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что значения интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ КЗ в бортовой системе электроснабжения ЛА прямо пропорциональны квадрату амплитуды I_{mk} установившегося тока КЗ и длительности t_{kC} (времени отключения, равному времени срабатывания t_a бортовых устройств защиты [13, 14]) протекания рассматриваемого КЗ. Видно, что чем больше численные значения величин I_{mk} и t_{kC} , тем будут большими и численные значения искомой величины интеграла J_{ak} . В табл. 3 при $T_a=3$ мс ($f=400$ Гц) для четырех фиксиро-

ванных численных значений амплитуды I_{mk} установившегося тока КЗ (3, 5, 10 и 30 кА) и двух возможных согласно [13, 14] численных значений длительности t_{kc} однофазного КЗ в бортовой сети ЛА (5 и 100 мс) приведены численные значения интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ указанного КЗ, рассчитанные по (6).

Таблица 3

Численные значения интеграла действия J_{ak} для тока $i_k(t)$ КЗ по (4), протекающего в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА ($f=400$ Гц; $T_a=3$ мс)

Численное значение амплитуды I_{mk} установившегося тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой силовой цепи электрооборудования ЛА, кА	Значение интеграла действия J_{ak} для тока $i_k(t)$ КЗ по (4), А ² ·с	
	$t_{kc}=5$ мс	$t_{kc}=100$ мс
3	$3,55 \cdot 10^4$	$4,63 \cdot 10^5$
5	$9,86 \cdot 10^4$	$12,86 \cdot 10^5$
10	$39,46 \cdot 10^4$	$51,44 \cdot 10^5$
30	$35,51 \cdot 10^5$	$46,30 \cdot 10^6$

Определив по (6) значения интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ КЗ (см. табл. 3) и зная численные значения коэффициента C_{ik} (см. табл. 2), на основании (1) могут быть найдены численные значения предельно допустимых сечений S_{il} токонесущих частей рассматриваемой КПП в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА. Используя принятые допущения, при заданных амплитудах I_{mk} из соотношения вида $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$ могут быть количественным образом оценены и предельно допустимые амплитуды плотности δ_{ilm} тока в материалах жил (оболочек) исследуемой КПП бортовой сети ЛА для аварийного режима КЗ.

2.3. Результаты выбора предельно допустимых сечений S_{il} и плотностей тока δ_{ilm} в проводах и кабелях бортовой сети ЛА. В табл. 4 приведены результаты расчета по (1) с учетом данных, сведенных в табл. 2 и 3, предельно допустимых сечений S_{il} токонесущих медных (алюминиевых) частей КПП бортовых силовых цепей электрооборудования ЛА при $f=400$ Гц, $J_{il} \neq 0$, $t_{kc}=5$ мс и амплитуде I_{mk} тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети самолета (ракеты-носителя), изменяющейся дискретно в диапазоне (3-30) кА.

Таблица 4

Значения предельно допустимых сечений S_{il} для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА с амплитудой I_{mk} тока $i_k(t)$ однофазного КЗ от 3 до 30 кА ($f=400$ Гц; $J_{il} \neq 0$; $t_{kc}=5$ мс; $T_a=3$ мс)

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электрооборудования ЛА	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значение сечения S_{il} , мм ²			
		Амплитуда I_{mk} установившегося тока КЗ, кА			
		3	5	10	30
Без изоляции	Медь	1,21	2,01	4,03	12,08
	Алюминий	2,14	3,57	7,14	21,41
ПВХ, Р	Медь	1,62	2,71	5,41	16,24
	Алюминий	2,55	4,24	8,49	25,46
ПЭТ	Медь	1,96	3,27	6,54	19,63
	Алюминий	3,04	5,06	10,13	30,39

Следует указать, что вопросы выбора предельно допустимых поперечных сечений S_{il} жил (оболочек-

экранов) исследуемой КПП для случая, когда $f=50$ Гц ($J_{il} \neq 0$; $t_{kc}=(100-160)$ мс; $I_{mk}=(30-100)$ кА; $T_a=20$ мс) были подробно рассмотрены автором в [1]. Сравнивая данные для S_{il} из указанной выше табл. 4 и из табл. 5 в [1], можно заключить, что переход в бортовой сети ЛА на частоту переменного тока $f=400$ Гц (в восемь раз большую частоты $f=50$ Гц, используемой в силовых цепях электроэнергетических объектов наземного базирования) позволяет за счет применения в бортовой сети ЛА быстродействующих автоматов защиты от КЗ (например, типа АЗ-250 на токи амплитудой до 6 кА) [13, 14] и соответственно резкого уменьшения при $f=400$ Гц времени t_{kc} действия тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА (со 100 мс до 5 мс) существенно уменьшить численные значения предельно допустимых сечений S_{il} ее медных (алюминиевых) проводов и кабелей (для аварийного режима при $I_{mk}=30$ кА примерно в 3,9 раза). Это может приводить к аналогичному уменьшению (в 3,9 раза) и массогабаритных показателей указанной КПП, устанавливаемой на борт ЛА. Разумеется, что, несмотря на указанные преимущества использования в бортовых сетях ЛА частоты переменного тока $f=400$ Гц и быстродействующих автоматов защиты от КЗ (например, для автоматов АЗ-250 $t_a=5$ мс), не так просто имеющиеся в авиационной и ракетно-космической технике наработки и схемно-технические решения в части тепловой защиты от КЗ сравнительно маломощных низковольтных бортовых сетей ЛА ($f=400$ Гц) перенести на наземные мощные высоковольтные электрические сети промышленного электроснабжения ($f=50$ Гц).

Из данных табл. 4 следует, что предельно допустимые амплитуды плотности $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$ тока $i_k(t)$ однофазного КЗ при времени его протекания (отключения) $t_{kc}=5$ мс в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА ($f=400$ Гц; $T_a=3$ мс) для неизолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами составляют примерно $2,48$ кА/мм² и $1,40$ кА/мм² соответственно, для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ и Р изоляцией – $1,85$ ($1,18$) кА/мм², а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – $1,53$ ($0,99$) кА/мм². Причем, указанные численные значения предельно допустимых амплитуд плотности δ_{ilm} тока КЗ в рассматриваемых проводниковых материалах токонесущих частей проводов (кабелей) бортовой сети ЛА не зависят от уровня амплитуды I_{mk} установившегося аварийного тока частотой $f=400$ Гц в них.

Приведенные выше численные данные для δ_{ilm} в КПП бортовой сети ЛА ($f=400$ Гц) по сравнению с аналогичными численными значениями из [1] предельно допустимых амплитуд плотности δ_{ilm} тока $i_k(t)$ при КЗ, характерных для указанного случая ($J_{il} \neq 0$; $t_{kc}=100$ мс; $I_{mk}=30$ кА; $T_a=20$ мс) и рассматриваемой КПП силовых цепей электрооборудования общепромышленного назначения ($f=50$ Гц), оказываются примерно в 3,9 раза большими. Для оценки влияния длительности t_{kc} протекания КЗ в бортовой силовой цепи ЛА на выбор значений предельно допустимых сечений S_{il} исследуемых проводов и кабелей в табл. 5 приведены данные, соответствующие случаю $t_{kc}=100$ мс.

Таблица 5

Значения предельно допустимых сечений S_{il} для проводов (кабелей) с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА с амплитудой I_{mk} тока $i_k(t)$ однофазного КЗ от 3 до 30 кА ($f=400$ Гц; $J_{il}\neq 0$; $t_{kc}=100$ мс; $T_a=3$ мс)

Вид изоляции в проводе (кабеле) цепи электрооборудования ЛА	Материал жилы (оболочки) провода (кабеля)	Значение сечения S_{il} , мм ²			
		Амплитуда I_{mk} установившегося тока КЗ, кА			
		3	5	10	30
Без изоляции	Медь	4,36	7,27	14,54	43,62
	Алюминий	7,73	12,89	25,77	77,32
ПВХ, Р	Медь	5,86	9,78	19,55	58,66
	Алюминий	9,19	15,32	30,65	91,95
ПЭТ	Медь	7,09	11,81	23,62	70,88
	Алюминий	10,97	18,29	36,58	109,75

Отметим, что количественные результаты для сечений S_{il} токонесущих частей КПП бортовой сети ЛА ($f=400$ Гц), представленные в табл. 5, были получены по (1) с учетом данных табл. 2 и 3 для режима, когда в бортовых цепях электрооборудования ЛА с активно-индуктивной нагрузкой выполняется равенство $T_a=3$ мс, а в качестве бортовых устройств защиты на ЛА от КЗ используются автоматы защиты типа АЗДЗ-200 ($t_a=100$ мс) [13, 14]. Из данных табл. 5 вытекает, что при $t_{kc}=100$ мс вне зависимости от численного значения токовой амплитуды I_{mk} предельно допустимые амплитуды плотности $\delta_{ilm}\approx I_{mk}/S_{il}$ аварийного тока $i_k(t)$ при КЗ для неизолированных проводов с медными и алюминиевыми жилами в бортовых цепях электрооборудования ЛА ($T_a=3$ мс) составляют около 0,69 кА/мм² и 0,39 кА/мм² соответственно, для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками), ПВХ и Р изоляцией – 0,51 (0,33) кА/мм², а для кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 0,42 (0,27) кА/мм². Полученные результаты как для S_{il} , так и δ_{ilm} ($f=400$ Гц; $t_{kc}=100$ мс) от соответствующих количественных данных для S_{il} и δ_{ilm} ($f=50$ Гц; $t_{kc}=100$ мс) из [1] отличаются (из-за различных значений параметра T_a , который в первом случае численно составлял 3 мс, а во втором – 20 мс) практически не более, чем на 8 %. Отсюда можно заключить, что на выбор в бортовой сети ЛА предельно допустимых сечений S_{il} ее КПП и соответственно предельно допустимых амплитуд плотности δ_{ilm} тока в токоведущих медных (алюминиевых) частях ее проводов и кабелей определяющее влияние оказывает не частота f переменного тока в бортовой сети ЛА, а длительность t_{kc} протекания в рассматриваемой электрической сети аварийного тока $i_k(t)$ КЗ.

Учитывая вышеизложенное, для уменьшения в бортовых цепях электрооборудования ЛА предельно допустимых поперечных сечений S_{il} применяемых в них электрических проводов (кабелей) и соответственно обеспечения снижения для ЛА массогабаритных показателей их бортовой КПП необходимо в бортовых сетях ЛА наряду с использованием повышенной частоты f переменного тока (например, $f=400$ Гц) применять быстродействующие автоматы защиты от КЗ, имеющие времена срабатывания $t_a<100$ мс.

2.4. Расчетная оценка термической стойкости проводов и кабелей в бортовой сети ЛА. Предлагаемый подход к расчетному выбору предельно допустимых поперечных сечений S_{il} рассматриваемых проводов (кабелей) в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА ($f=400$ Гц) позволяет осуществить и расчетную оценку их термической стойкости. При этом, как и в [1, 8], термическую стойкость исследуемой КПП в бортовой сети ЛА предлагается определять по следующему теплофизическому условию:

$$\theta_{is} \leq \theta_{IS}, \quad (7)$$

где θ_{is} , θ_{IS} – соответственно текущая (конечная) и предельно допустимая кратковременная температуры нагрева токонесущих частей рассматриваемых электрических проводов и кабелей в бортовых цепях ЛА.

Для нахождения в (7) значений текущей или конечной температуры θ_{is} нагрева материала токонесущих частей КПП, определяемой джоулевым теплом от действия на него тока $i_k(t)$ КЗ, первоначально используем известную нелинейную зависимость удельной электропроводности γ_i материала жилы (оболочки) провода и кабеля от величины температуры θ_{is} [1, 9]:

$$\gamma_i = \gamma_{0i} [1 + c_{0i} \beta_{0i} (\theta_{is} - \theta_0)]^{-1}. \quad (8)$$

Важно отметить, что соотношение (8) в интервале температур от 20 °С до температуры плавления материалов жил (оболочек) КПП согласно экспериментальным данным из [9] аппроксимирует температурную зависимость величины γ_i для меди и алюминия с погрешностью не более 5 %. Заметим, что в (8) под величиной γ_{0i} понимается удельная электропроводность γ_i проводникового материала токонесущих частей КПП при температуре $\theta_0=20$ °С. Тогда учитывая (8), решение неоднородного дифференциального уравнения первого порядка для конечной температуры θ_{is} джоулевого нагрева током $i_k(t)$ однофазного КЗ материала жилы (оболочки) КПП в бортовой силовой цепи электрооборудования ЛА при начальном условии вида $[\theta_{is}|_{t=0} - \theta_{0i}]=0$ может быть записано в следующем приближенном аналитическом виде [1, 12]:

$$\theta_{is} = \theta_{0i} + (c_{0i} \beta_{0i})^{-1} [\exp(J_{ak} \gamma_{0i}^{-1} \beta_{0i} / S_{il}^2) - 1], \quad (9)$$

где θ_{0i} – первоначальная температура материала токонесущих частей КПП, составляющая в зависимости от режима работы бортовых цепей электрооборудования величину θ_{il} ($J_{il}\neq 0$) или величину $\theta_0=20$ °С ($J_{il}=0$).

Из (9) видно, что при принятых допущениях, известных численных значениях теплофизических характеристик γ_{0i} , c_{0i} и β_{0i} для рассматриваемых проводниковых материалов токонесущих частей КПП в бортовой сети ЛА (см. данные табл. 1), а также для найденных по (1) и (6) численных значений предельно допустимых поперечных сечений S_{il} медных (алюминиевых) жил (оболочек) проводов (кабелей) и интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ однофазного КЗ определение искомой величины конечной температуры θ_{is} и ее сравнение по условию (7) с известной согласно [8] допустимой кратковременной температурой θ_{IS} не вызывает ни каких электротехнических затруднений.

В качестве примера по расчетной оценке согласно условию (7) термической стойкости КПП бортовой сети ЛА ($f=400$ Гц; $J_{il}\neq 0$; $\theta_{0i}=\theta_{il}=65$ °С) рассмотрим

случай, когда для ее авиационного экранированного провода марки БПВЛЭ с ПВХ изоляцией и медной расщепленной жилой [7, 15] в аварийном режиме однофазного КЗ выполняются следующие исходные данные: $I_{mk}=5$ кА; $t_{kc}=5$ мс; $T_a=3$ мс. Согласно данным табл. 4 для указанных исходных параметров предельно допустимое поперечное сечение S_{il} рассматриваемого провода численно составляет примерно $2,71$ мм². В этом случае величина интеграла действия J_{ak} тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА по (6) будет численно составлять около $9,86 \cdot 10^4$ А²·с (см. табл. 3). Тогда по (9) с учетом данных табл. 1 конечная температура θ_{is} джоулевого нагрева аварийным током $i_k(t)$ КЗ вида (4) рассматриваемого медного провода, установленного в бортовой сети ЛА, окажется численно равной около $133,8$ °С. Видно, что полученное расчетное значение конечной температуры $\theta_{is}=133,8$ °С меньше предельно допустимой кратковременной температуры θ_{is} нагрева проверяемого на термическую стойкость авиационного медного провода марки БПВЛЭ с ПВХ изоляцией, составляющей 150 °С [8]. Поэтому можно заключить, что условие (7) для этого расчетного случая применительно к бортовой сети ЛА выполняется.

В этой связи можно говорить о том, что выполненная по (7) расчетная оценка термической стойкости авиационного провода марки БПВЛЭ с медной жилой и ПВХ изоляцией силовых цепей электрооборудования ЛА с переменным током частотой $f=400$ Гц указывает на работоспособность предложенного электротехнического подхода к расчетному выбору предельно допустимых сечений S_{il} токонесущих частей КПП, применяемой в бортовых сетях различных ЛА.

3. Влияние частоты тока в бортовой сети ЛА на время срабатывания устройства ее защиты от КЗ. Этот малоизученный на сегодня в области прикладной электротехники вопрос рассмотрим на примере возможного применения в бортовой сети ЛА защитного устройства (предохранителя) от КЗ, использующего не расплавляющуюся из-за джоулевого нагрева током КЗ металлическую плоскую пластину (как в обычном плавком электрическом предохранителе [11, 16]), а электрически взрывающуюся металлическую круглую проволоку [9, 12]. Известно, что время срабатывания t_a обычных плавких электрических предохранителей (например, одних из лучших в мире серии Ultra Quick на амплитуды тока промышленной частоты $f=50$ Гц до $1,4$ кА [17]) составляет не менее 10 мс. Уменьшить эти значения времени t_a срабатывания устройства защиты до единиц миллисекунд или долей единицы миллисекунды возможно за счет применения в исследуемой бортовой сети ЛА быстродействующих предохранителей (БП), использующих явление ЭВ металлической проволоки под действием аварийного тока КЗ частотой $f=400$ Гц с амплитудой I_{mk} в единицы (десятки) килоампер [9, 18].

Воспользуемся известным аналитическим соотношением, определяющим время ЭВ t_e в атмосферном воздухе (время срабатывания t_a БП) круглой металлической проволоки сечением S_i при протекании через нее аварийного тока $i_k(t)$ КЗ в бортовой сети ЛА [18]:

$$t_e = 1,333 \cdot \left[J_c S_i^2 / (2\pi^2 f^2 k_s^2 I_{mk}^2) \right]^{1/3}, \quad (10)$$

где J_c – критическое значение интеграла тока для проводящего материала электрически взрывающейся металлической проволоки (для меди – $J_c=1,95 \cdot 10^{17}$ А²·с·м⁻⁴ [9]; для алюминия – $J_c=1,09 \cdot 10^{17}$ А²·с·м⁻⁴ [9]).

Из (10) при $f=400$ Гц, $k_s=1,66$ ($T_a=3$ мс) и $I_{mk}=30$ кА для круглой медной проволоки ($J_c=1,95 \cdot 10^{17}$ А²·с·м⁻⁴) радиусом $r_i=1$ мм ($S_i=3,141$ мм²) величина времени срабатывания t_a рассматриваемого БП (времени воздушного ЭВ t_e этой проволоки) от воздействия на него (этот тип предохранителя) переменного тока $i_k(t)$ КЗ в бортовой сети ЛА составляет примерно $0,84$ мс. Как видим, ЭВ указанной проволоки, составляющей основу рассматриваемого БП, происходит на фронте первой полуволны аварийного тока $i_k(t)$ (максимум этой полуволны при $f=400$ Гц соответствует времени $t_m=1,25$ мс), протекающего при однофазном КЗ в исследуемой бортовой сети ЛА. Отметим, что для $I_{mk}=20$ кА при прежних указанных выше исходных данных время срабатывания t_a БП (время ЭВ t_e принятой круглой медной проволоки сечением $S_i=3,141$ мм²) оказывается равным около $1,09$ мс. Из (10) следует, что время ЭВ t_e металлической проволоки в бортовой сети ЛА с переменным током частотой f обратно пропорционально величине $(f)^{2/3}$. Чем выше частота f переменного тока в бортовой сети ЛА, тем будет меньше время срабатывания t_a указанного БП. Переход в бортовой сети ЛА с частоты $f=50$ Гц переменного тока на его частоту $f=400$ Гц приводит к уменьшению времени срабатывания t_a БП, использующего ЭВ металлической проволоки, в четыре раза.

Учитывая выявленную особенность влияния величины частоты f на время срабатывания t_a рассматриваемого БП, применение повышенной частоты переменного тока (например, $f=400$ Гц) в бортовой сети ЛА с позиции возможности повышения быстродействия устройства ее защиты от КЗ, работа которого основывается на явлении ЭВ металлической проволоки, является технически оправданным предложением.

Выводы.

1. Предложенный инженерный электротехнический подход позволяет по условию термической стойкости КПП бортовых силовых цепей электрооборудования ЛА с переменным током повышенной частоты $f=400$ Гц осуществлять расчетный выбор предельно допустимых поперечных сечений S_{il} неизолированных проводов, изолированных проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) с ПВХ, Р и ПЭТ изоляцией, токонесущие части которых в аварийном режиме их работы могут испытывать воздействие тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в бортовой сети ЛА с прогнозируемыми и подтвержденными многолетним опытом эксплуатации различных ЛА амплитудно-временными параметрами.

2. Установлено, что в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА ($f=400$ Гц; $T_a=3$ мс) предельно допустимые амплитуды плотности $\delta_{lim} \approx I_{mk}/S_{il}$ тока $i_k(t)$ однофазного КЗ при времени его отключения $t_{kc}=5$ мс в бортовой электрической сети ЛА вне зависимости от численного значения амплитуды I_{mk} установившегося тока КЗ для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами составляют соответственно около $2,48$ ($1,40$) кА/мм², для про-

водов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПВХ (Р) изоляцией – 1,85 (1,18) кА/мм², а для проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 1,53 (0,99) кА/мм². При увеличении в бортовой электрической сети ЛА времени отключения $t_{кз}$ тока $i_k(t)$ однофазного КЗ в указанных силовых цепях ЛА ($T_a=3$ мс) предельно допустимые амплитуды плотности δ_{ilm} аварийного тока КЗ уменьшаются и при $t_{кз}=100$ мс для неизолированных проводов с медными (алюминиевыми) жилами составляют соответственно примерно 0,69 (0,39) кА/мм², для проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПВХ (Р) изоляцией – 0,51 (0,33) кА/мм², а для проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (оболочками) и ПЭТ изоляцией – 0,42 (0,27) кА/мм².

3. Определяющее влияние на выбор в бортовой сети ЛА предельно допустимых сечений S_{il} ее КПП и соответственно предельно допустимых амплитуд плотности δ_{ilm} тока в токоведущих медных (алюминиевых) частях ее проводов и кабелей оказывает не частота f переменного тока в бортовой сети ЛА, а длительность $t_{кз}$ протекания (время отключения) в бортовой электрической сети аварийного тока $i_k(t)$ КЗ.

4. Для уменьшения в бортовых силовых цепях электрооборудования ЛА предельно допустимых сечений S_{il} применяемых в них не- и изолированных электрических проводов (кабелей) и соответственно обеспечения снижения для различных ЛА массогабаритных показателей их бортовой КПП необходимо в бортовых сетях ЛА наряду с использованием повышенной частоты $f=400$ Гц переменного тока применять быстродействующие устройства (автоматы) защиты от КЗ с временем их срабатывания $t_{аэ} < 100$ мс.

5. Показано, что применение повышенной частоты $f=400$ Гц переменного тока в бортовых сетях ЛА по сравнению с его частотой $f=50$ Гц приводит к значительному повышению (в четыре раза) быстродействия устройств (предохранителей) их защиты от КЗ, работа которых базируется на воздушном ЭВ круглой металлической (в частности, медной) проволоки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Уточненный выбор допустимых сечений электрических проводов и кабелей в силовых цепях промышленного электрооборудования с учетом аварийных режимов работы. – 2019. – № 3. – С. 37-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.06.
2. Баранов М.И. Выбор критических сечений электрических проводов и кабелей в силовых цепях электрооборудования промышленной электроэнергетики // Электротехника и электромеханика. – 2019. – № 5. – С. 35-39. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.06.
3. Справочник по проектированию электрических сетей и оборудования / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
4. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Высшая школа, 1972. – 432 с.
5. <https://docplayer.ru/27377176-Lekciya-2-1-razdel-2-bortovaya-elektricheskaya-set-vozdushnogo-sudna-tema-2-1-elektricheskaya-provodka.html>.
6. https://ru.wikipedia.org/wiki/Бортовая_система_электроснабжения_летательных_аппаратов.

7. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
8. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии. Том 3, Кн. 1 / Под общей ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
9. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
10. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 48: Авиаконструктор Андрей Туполев и его свершения в самолетостроении // Электротехника и электромеханика. – 2019. – №2. – С. 3-8. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.01.
11. Системы электроснабжения летательных аппаратов (Учебник) / Под ред. С.П. Халютин. – М.: ВВИА имени Н.Е. Жуковского, 2010. – 428 с.
12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.
13. Отраслевой стандарт ОСТ 1 00195-76. Аппараты защиты бортовых электрических сетей самолетов и вертолетов. Методика выбора и проверки правильности установки в системах электроснабжения. – М.: Госстандарт СССР, 1976. – 167 с.
14. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293834/4293834330.htm>.
15. Власов Г.Д. Проектирование систем электроснабжения летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 415 с.
16. https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_предохранитель.
17. <https://www.compel.ru/lib/na/2014/3/2-klassika-navsegda-sovremennyye-plavkie-predohraniteli-i-derzhatelyi-razediniteli>.
18. Баранов М.И., Лысенко В.О. Основные характеристики электрического взрыва металлического проводника при больших импульсных токах // Электричество. – 2013. – №4. – С. 24-30.

REFERENCES

1. Baranov M.I. Refined selection of allowable cross-sections of electrical conductors and cables in the power circuits of industrial electrical equipment taking into account emergency operating modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 3, pp. 37-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.06.
2. Baranov M.I. A choice of critical sections of electric wires and cables in power circuits of electrical equipment of power industry. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 35-39. doi: 10.20998/2074-272X.2019.5.06.
3. Barybin Yu.G. *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey i oborudovaniya* [Handbook for planning electrical circuit and equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 464 p. (Rus).
4. Knyazevskiy B.A., Lipkin B.Yu. *Elektricheskoye snabzheniye promyshlennyykh predpriyatiy* [Electric supply industrial organization]. Moscow, High school Publ., 1972. 432 p. (Rus).
5. Available at: <https://docplayer.ru/27377176-Lekciya-2-1-razdel-2-bortovaya-elektricheskaya-set-vozdushnogo-sudna-tema-2-1-elektricheskaya-provodka.html> (accessed 23 May 2019). (Rus).
6. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Бортовая_система_электроснабжения_летательных_аппаратов (accessed 11 May 2019). (Rus).
7. Belorussov N.I., Saakjan A.E., Yakovleva A.I. *Elektricheskie kabeli, provoda i shnury. Spravochnik* [Electrical cables, wires and cords. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 536 p. (Rus).
8. Orlov I.N. *Elektrotehnicheskij spravochnik. Proizvodstvo i raspredeleniye elektricheskoy energii. Tom 3, Kn. 1* [Electrical engineering handbook. Production and distribution of electric energy. Vol. 3, Book 1. Ed. I.N. Orlov]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 880 p. (Rus).

9. Knopfel' G. *Sverkhshil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
10. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 48: Aircraft designer Andrey Tupolev and his accomplishments in airplane design. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.2, pp. 3-8. doi: 10.20998/2074-272X.2019.2.01.
11. Khalyutin S.P. *Sistemy elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov* [Systems of electric supply of aircrafts]. Moscow, AFEA to the name of N.E. Zhukovskogo Publ., 2010. 428 p. (Rus).
12. Baranov M.I. *Izbrannyye voprosy elektrofiziki. Monografiya v 3kh tomakh. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of Electrophysics. Monograph in 3 Vols. Vol. 3. Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
13. *Otraslevoy standart OST 1 00195-76. Apparaty zashchity bortovykh elektricheskikh setey samoletov i vertoletov. Metodika vybora i proverki pravil'nosti ustanovki v sistemah elektrosnabzheniya* [Industry standard OST 1 00195-76. Vehicles of protection of side electric networks of airplanes and helicopters. Is there a method of choice and verification of rightness of setting in the systems of electric supply]. Moscow, National Standard of the USSR Publ., 1976. 167 p. (Rus).
14. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293834/4293834330.htm> (accessed 10 June 2019). (Rus).
15. Vlasov G.D. *Proektirovanie sistem elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov* [Planning of the systems of electric supply of aircrafts]. Moscow, Engineer Publ., 1967. 415 p. (Rus).
16. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fuse_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fuse_(electrical)) (accessed 10 June 2019).
17. Available at: <https://www.compel.ru/lib/na/2014/3/2-klasyka-navsegda-sovremennyye-plavkie-predohraniteli-i-derzhately-razediniteli> (accessed 20 July 2019). (Rus).
18. Baranov M.I., Lysenko V.O. The main characteristics of an electric explosion of a metallic conductor at high impulse currents. *Electricity*, 2013, no.4, pp.24-30. (Rus).

Поступила (received) 29.05.2019

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с.,
НИПКИ «Молния»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +380 57 7076841,
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

A choice of acceptable sections of electric wires and cables in on-board circuits of aircraft electrical equipment.

Purpose. Implementation of choice of maximum permissible sections S_{il} of the uninsulated wires and insulated wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells) in the on-board power circuits of electrical equipment of different aircrafts with AC

current of frequency $f > 50$ Hz. **Methodology.** Theoretical bases of the electrical engineering, electrophysics bases of technique of high voltage and high pulsed currents, applied thermal physics. **Results.** The engineering approach is developed for a calculation choice on the condition of thermal resistibility of aircraft cable-conductor products (CCP) of maximum permissible sections S_{il} of the uninsulated wires, insulated wires and cables with copper (aluminum) cores (shells), polyvinyl chloride (PVC), rubber (R) and polyethylene (PET) insulation, on which in malfunction of operation of on-board aircraft network with AC frequency of $f > 50$ Hz flows of $i_k(t)$ current at single phase short circuit (SC) with given amplitude-temporal parameters. It is determined that in the on-board power circuits of electrical equipment of aircrafts ($f=400$ Hz; for permanent time of slump of $T_a=3$ ms of aperiodic constituent of current of SC) maximum permissible amplitudes of current density of $\delta_{ilm} \approx I_{mk}/S_{il}$ of single phase SC at time of its disconnecting $t_{kc}=5$ ms in the on-board network of aircraft without dependence on the numerical value of amplitude I_{mk} of the given current of SC for the uninsulated wires with copper (aluminum) cores is accordingly about 2.48 (1.40) kA/mm², for wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells) and PVC (R) with insulation – 1.85 (1.18) kA/mm², and for wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells) and PET insulation – 1.53 (0.99) kA/mm². The influence on a choice in the on-board network of aircrafts of maximum permissible sections S_{il} of its CCP and accordingly maximum permissible amplitudes of current density δ_{ilm} of current copper (aluminum) parts of its wires and cables of frequency f of AC in the on-board network of aircraft is determined, but duration of flow t_{kc} (time of disconnecting) renders in the on-board network of aircrafts of emergency current of SC $i_k(t)$. For diminishing in the on-board power circuits of electrical equipment of aircrafts of maximum permissible sections S_{il} of the electric wires (cables) applied in them and accordingly providing of decline for different aircrafts of mass and overall indicators of their on-board CCP is needed in the on-board networks of aircrafts along with the use of enhance frequency of $f=400$ Hz of AC to apply the fast-acting devices of their protecting from SC in course of time wearing-outs of $t_a < 100$ ms. It is shown that application of enhance frequency of $f=400$ Hz of AC in the on-board networks of aircrafts as compared to its frequency of $f=50$ Hz results in the considerable increase (in four times) of fast-acting of devices of their protection from SC, operation of which is based on the air electric explosion of metallic wire. **Originality.** First for the on-board network of aircrafts with AC of frequency of $f=400$ Hz the maximum permissible sections S_{il} and amplitudes of current density δ_{ilm} of SC are determined for the uninsulated wires and insulated wires (cables) with copper (aluminum) cores (shells), PVC, R and PET insulation. **Practical value.** The obtained results will be used in the increase of thermal resistibility of CCP with copper (aluminum) cores (shells), PVC, R and PET insulation applied in the on-board electric networks of different aircrafts. References 18, tables 5.

Key words: aircraft, on-board power circuits of electrical equipment, electric wires and cables, frequency of alternating current, selection of maximum permissible cross-sections of cable products.